

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ С ОСНОВАНИЕМ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.Г. Тяпин ⁽¹⁾

⁽¹⁾ АО «Атомэнергопроект», Москва, Россия, E-mail: atyapin@bvcp.ru

Аннотация. В докладе представлены результаты расчета высотного здания на сейсмическое воздействие с применением комбинированного асимптотического метода (КАМ), позволяющего учитывать взаимодействие сооружения с грунтовым основанием. В качестве модели основания выбрано однородное полупространство со свойствами среднего грунта. Фундамент считается жестким и поверхностным штампом. Результаты сравниваются с результатами расчета того же сооружения по схеме защемленного фундамента, а также (качественно) с результатами расчета сооружений АЭС на сейсмические воздействия.

INTERACTION OF A HIGH-RISE BUILDING WITH A BASE UNDER THE SEISMIC ACTION

A.G. Tyapin ⁽¹⁾

⁽¹⁾ JSC "Atomenergoprojekt", Moscow, Russia. E-mail: atyapin@bvcp.ru

Abstract. The report presents the results of calculating a high-rise building for seismic actions with use of the combined asymptotic method (CAM), which allows taking into account the interaction of a structure with a soil base. A homogeneous half-space with medium soil properties was chosen as the base model. The foundation is considered a stiff and surface stamp. The results are compared with the results of a calculation for the same structure according to the scheme of the fixed foundation, as well as (qualitatively) with the results of the calculation of the NPP structures for seismic actions.

СЕЙСМИКАЛЫК ТААСИР ЭТҮҮДӨ БИЙИК ИМАРАТТАРДЫН НЕГИЗИ МЕНЕН ӨЗ АРА АРАКЕТТЕНҮҮСҮ

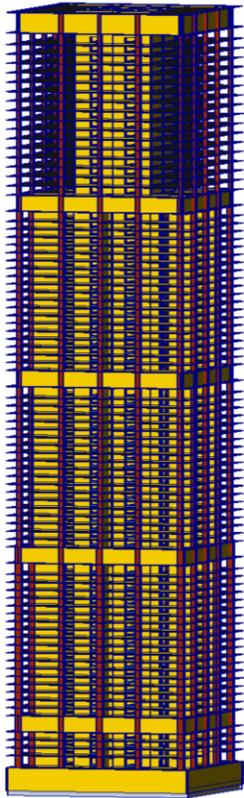
А.Г. Тяпин ⁽¹⁾

⁽¹⁾ «Атомэнергопроект» АК, Москва, Россия, E-mail: atyapin@bvcp.ru

Аннотация. Макалада кыртыштык негиз менен курулманын өз ара аракеттенүүсүн эске алууга мүмкүндүк берүүчү аралаш асимптотикалык ыкманы (КАМ) колдонуу менен сейсмикалык таасир этүүгө бийик имараттардын эсебинин жыйынтыктары сунушталган. Негиздин модели катарында орто кыртыштык касиети менен бир түрдүү жарым алкак тандалган. Пайдубал катуу жана үстүңкү катмардагы штамп болуп эсептелет. Жыйынтыктары кыстырылган пайдубалдын схемасы боюнча ошол эле курулманын эсебинин жыйынтыктары жана дагы, АЭС курулмаларынын сейсмикалык таасир этүүлөргө эсебинин жыйынтыктары менен салыштырылат.

Комбинированный асимптотический метод (КАМ) [1] более десяти лет активно используется в расчетах сооружений АЭС на сейсмические воздействия и доказал свою

эффективность для учета взаимодействия сооружений с основанием. Однако ряд гражданских сооружений по своим параметрам (прежде всего, массе) приближается к ответственным объектам атомной энергетики. Автор откликнулся на предложение коллег применить КАМ для расчета высотного здания и проанализировать сходство и различия в результатах по сравнению с сооружениями АЭС.



76-этажное офисное здание с пятью аутригерными этажами имеет общую высоту 327 м. Геометрия объекта воссоздана авторами в бесплатном препроцессоре ФОРУМ в составе SCAD 21.1. Фундаментная плита имеет толщину 4 м и размеры в плане 40 х 40 м. Такие же размеры в плане имеют и этажи. Сооружение имеет массу 224804,6 т. Высота центра тяжести над срединной поверхностью фундаментной плиты составляет 144 м.

Изначально модель здания на защемленном фундаменте была собрана в программе СКАД, а затем конвертирована в программу ABAQUS, в которой и был проведен модальный анализ модели сооружения на защемленном фундаменте. Модель имела 214887 узлов и 1289322 степени свободы. Число конечных элементов составило 245759. Оказалось, что низшие частоты составляют порядка 0,1 Гц. Было вычислено 7500 низших форм; при этом собственные частоты поднялись только до 25,6 Гц. Модель сооружения показана на рис. 1.

В качестве основания зададим однородное полупространство со средними грунтами: плотность 2 т/м³, скорость сдвиговых волн $V_s=400$ м/с, скорость продольных волн $V_p=1300$ м/с. Материальное демпфирование в грунте примем на уровне 4%.

Подробности расчета по КАМ автор приводит в статье [2]. Здесь же сразу приведем результаты. Начнем со спектров ускорений на жестком фундаменте. На рис.2 показаны спектры ответа вертикальных ускорений воздействия и фундамента на трех грунтах.

Спектры поступательных ускорений в центре подошвы фундамента

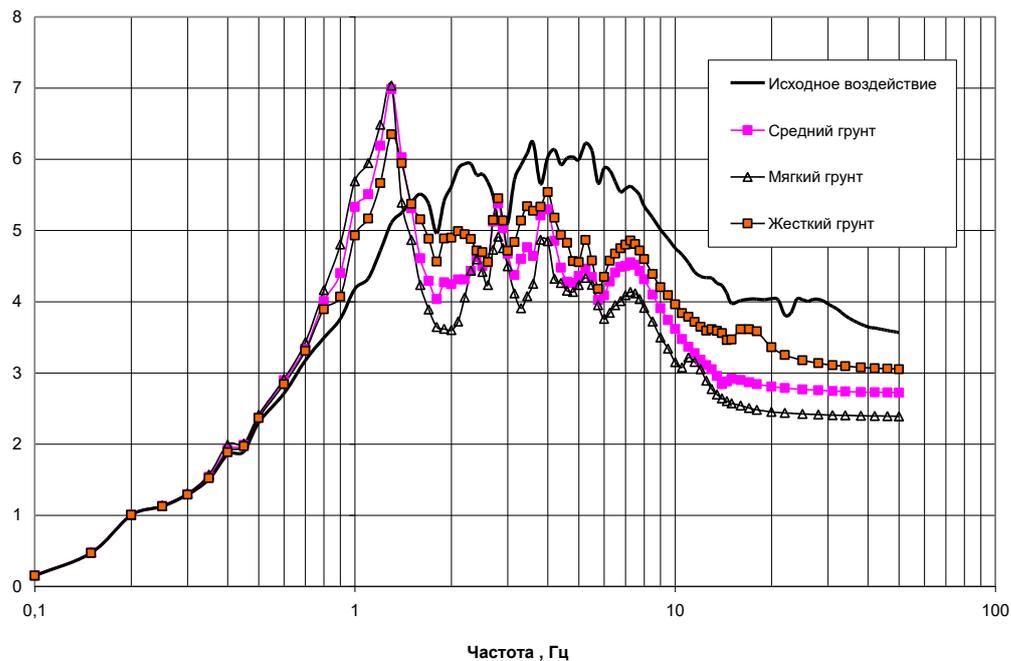


Рис.2. Спектры вертикальных ускорений (демпфирование 7%)

Мы наблюдаем на рис.2 картину, привычную для расчетчиков сравнительно жестких сооружений АЭС. На низких частотах спектр реакции совпадает со спектром воздействия (это физически очевидно и служит, скорее, проверкой правильности вычислений). Затем в районе первого доминантного резонанса спектр реакции имеет пик над спектром воздействия, после чего при дальнейшем повышении частоты уходит под спектр воздействия.

На рис.3 показаны спектры ответа горизонтальных ускорений воздействия и фундамента на трех грунтах (выбрано направление X, направление Y дает похожие результаты).

Спектры поступательных ускорений в центре подошвы фундамента

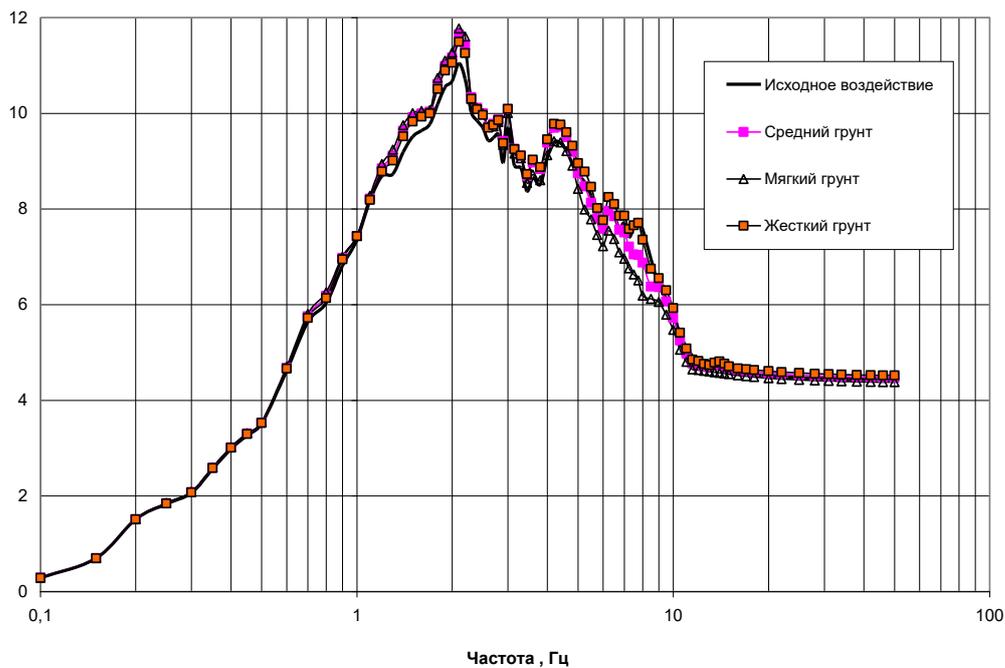


Рис.3. Спектры горизонтальных ускорений в направлении X

Первый вывод заключается в том, что роль податливости основания оказывается различной по разным направлениям. В вертикальном направлении податливость основания заметно меняет колебания фундамента по сравнению с колебаниями свободной поверхности основания, как это обычно происходит с сооружениями АЭС. По горизонтали ускорения фундамента, напротив, почти не отличаются от ускорений свободной поверхности основания. Применение критериев значимости взаимодействия с основанием (вычисление отношения первых собственных частот податливого сооружения на жестком основании и жесткого сооружения на податливом основании) подтверждает вывод о том, что в вертикальном направлении взаимодействие с основанием важно, а в горизонтально-качательных направлениях — не очень важно.

Правда, при учете взаимодействия с грунтовым основанием фундамент совершает еще и качательные движения (крутильные тоже, но они очень малы), которых не было в исходном воздействии. Спектры качательных ускорений вокруг оси ОУ показаны на рис.4.

Спектры угловых ускорений на подошве фундамента

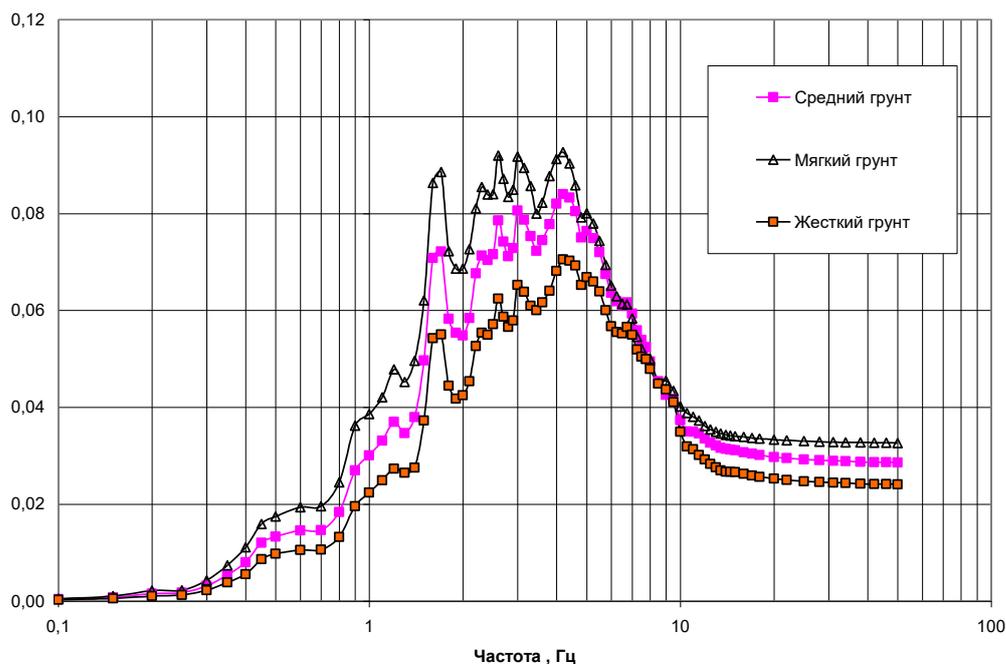


Рис.4. Спектры качательных ускорений вокруг оси OY

Второй вывод заключается в том, что первые собственные частоты, соответствующие горизонтально-качательным формам колебаний, очень малы (порядка 0,1 Гц) по сравнению с основными частотами сейсмического воздействия (порядка 2 Гц и выше). Относительные перемещения по этим формам происходят в закритической частотной области, т.е. в противофазе с воздействием. Абсолютные же перемещения оказываются очень малыми. Как результат, модальные массы этих форм мало участвуют в формировании усилий в нижней части сооружения. В итоге оказывается, что горизонтальные сдвигающие силы под подошвой фундамента в разы меньше вертикальной силы, хотя ускорения по горизонтали больше ускорений по вертикали. В таблице 1 показаны максимальные интегральные силы под подошвой фундамента для трех грунтов и варианта защемления.

Таблица 1. Сравнение максимальных по модулю усилий под подошвой, вызванных сейсмическим воздействием

Вариант	X	Y	Z	XX	YY	ZZ
Средний	0,20713E6	0,24391E6	0,78674E6	0,10259E8	0,10500E8	0,68797E5
Мягкий	0,20232E6	0,23229E6	0,74783E6	0,91761E7	0,99954E7	0,66400E5
Жесткий	0,22761E6	0,25129E6	0,85553E6	0,10978E8	0,11307E8	0,70847E5
Защемленный	0,27400E6	0,26882E6	0,84750E6	0,11914E8	0,12147E8	0,72057E5

В таблице 2 показаны максимальные ускорения подошвы фундамента для трех грунтов и варианта защемления.

Таблица 2. Сравнение максимальных по модулю ускорений в центре подошвы, вызванных сейсмическим воздействием

Вариант	X	Y	Z	XX	YY	ZZ
Средний	4,4672	4,4764	2,7123	0,33152E-1	0,28545E-1	0,90462E-3
Мягкий	4,3615	4,4306	2,3787	0,35942E-1	0,32532E-1	0,12283E-2
Жесткий	4,5110	4,5362	3,0297	0,28479E-1	0,24027E-1	0,61282E-3
Защемленный	4,4136	4,5192	3,4364	0	0	0

Из разных составляющих податливости основания наиболее важной для высотного здания оказывается качательная податливость. Благодаря высокой качательной податливости основания качательные колебания фундамента происходят в противофазе с горизонтальными колебаниями в той же плоскости, и усилия под фундаментной плитой уменьшаются по сравнению с усилиями при расчете на защемленном фундаменте. В целом, как видно из таблицы 1, все усилия под подошвой фундамента уменьшились по мере смягчения основания, т.е. расчет по схеме защемленного фундамента с точки зрения максимальных усилий под фундаментной плитой оказался консервативным.

Еще одно следствие низких горизонтально-качательных собственных частот – тот факт, что первые формы, доминирующие с точки зрения модальной массы, не будут доминирующими с точки зрения модальных реакций.

В будущем намечено проверить эффективность спектрального метода расчета с учетом качания фундамента. Еще одним важным направлением является учет податливости основания со свайными фундаментами. Если для атомной энергетики свайные фундаменты в сейсмических районах являются редкостью, и схема штампа на полупространстве вполне реалистична, то для гражданского строительства ситуация, скорее, обратная. Представляет интерес также сравнение ускорений по высоте сооружения для подтверждения или опровержения гипотезы о том, что верхняя часть движется меньше, чем нижняя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тяпин А.Г.** Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. Руководство по расчетам. М.: Издательство АСВ. 2014. 136 с.
2. **Тяпин А.Г., Топорков А.С., Михайлов В.С.** Применение комбинированного асимптотического метода для расчета высотного здания на сейсмическое воздействие: результаты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений (в печати).